



УДК 621.317.444

## ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

## FLUX DENSITY MEASUREMENT AT TECHNOLOGICAL APPLICATION INDUCTION DEVICE

**Соколов Игорь Владимирович**, аспирант каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: sokolov.i.v@urfu.ru

**Швыдкий Евгений Леонидович**, аспирант каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: e.l.shvydky@urfu.ru

**Igor V. Sokolov**, PhD student, Department of Electric Engineering and Electrotechnology Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: sokolov.i.v@urfu.ru

**Evgeniy L. Shvydkiy**, PhD student, Department of Electric Engineering and Electrotechnology Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, g. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: e.l.shvydky@urfu.ru

**Аннотация:** В работе рассматривается способ измерения индукции электротехнологических установок датчиками Холла с последующей оцифровкой сигнала и обработкой на ПК. Приводится состав оборудования, использованного для измерения, проведена серия опытов по измерению магнитной индукции на холостом ходу, произведено сравнение с расчетными характеристиками.

**Abstract:** In this paper, the induction measurement technique of electrotechnological installations by Hall sensors with subsequent digitization of the signal and processing on a PC is considered for. The composition of the equipment used for the measurement is presented, a series of experiments for measurement the magnetic induction was conducted and compared with the calculated characteristics.

**Ключевые слова:** магнитная индукция, расчет магнитной индукции, способ измерения, магнитный датчик.

**Key words:** magnetic flux, flux density calculation, measurement techniques, magnetic sensors.

### ВВЕДЕНИЕ

При проектировании индукционных устройств технологического назначения, представляется необходимым производить измерения индукции, потому что создаваемое магнитное поле не является однородным, что связано с погрешностями, возникающими в ходе производства и монтажа, а в индукторе электротехнологического устройства дополнительно имеет место концевой эффект.

При задании в параметрах численной модели симметричного источника магнитных полей, в ней могут не проявиться некоторые неустойчивости, существенно влияющие на динамику течения, которые присущи реальному устройству. Таким образом, главной задачей является измерение распределения магнитного поля в рабочей зоне электротехнологического устройства, для последующей коррекции модели. [1]

Сложная топология магнитных полей требует точных и, по возможности, автоматизированных систем измерения.

На сегодняшний день наиболее распространённым способом измерения индукции являются использование датчиков Холла или феррозондов в качестве первичных преобразователей, однако, рабочий диапазон феррозондов недостаточен для измерения в индукционных установках. [2]

Исходя из вышесказанного было принято решение использовать датчики Холла для непосредственно измерений,

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКИ

Для проверки измерительного комплекса использовались испытание на экспериментальной электротехнологической установке технологического действия, которая представляет

собой линейную машину, предназначенную для перемешивания расплава лития.

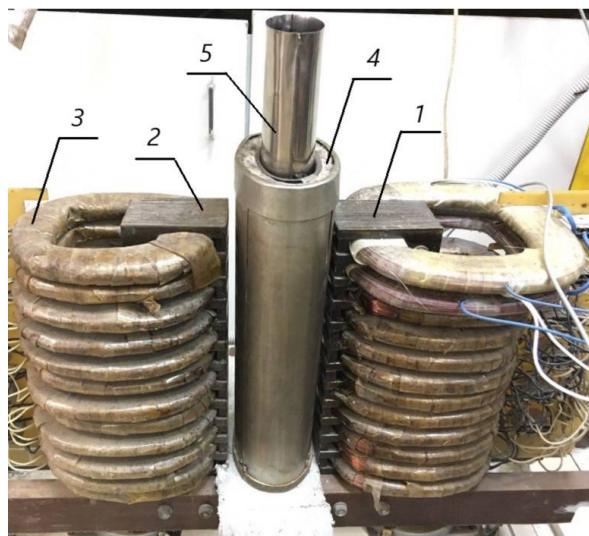


Рис. 1. Внешний вид перемешивателя лития: 1 – магнитопровод индуктора №1, 2 – магнитопровод индуктора №2, 3 – катушки индуктора, 4 – нагреватель, 5 – тигель из нержавеющей стали.

Конструкция приведена на рис. 1, магнитное поле создаётся катушками и передается в расплав магнитопроводами. В рамках исследования рабочих характеристик перемешивателя была проведена серия опытов на холостом ходу, измерялась индукция в воздушном зазоре и внутри тигля из нержавеющей стали. Катушки подключены по схеме AAZBZXCCYY, питаются синусоидальным напряжением 50 Гц [3].

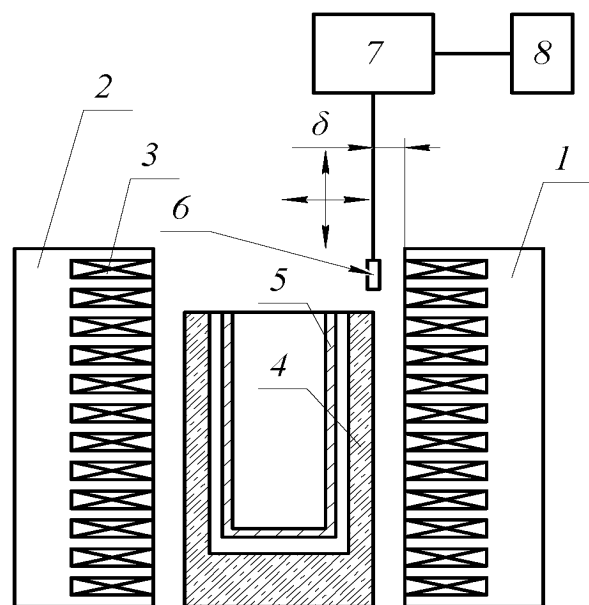


Рис. 2. Схема установки для измерения магнитной индукции в перемешивателе: 1 – сердечник индуктора №1, 2 – сердечник индуктора №2, 3 – датчик Холла SEC SS49E, 4 – плата сбора данных NI USB-6216, 5 – ПК с установленным ПО NI LabView.

Схема установки изображена на рис. 2. Для измерения магнитной индукции использовался линейный датчик Холла SEC SS49E, в качестве вторичного преобразователя – плата сбора данных NI USB-6216, частота дискретизации – 50 кГц.

Измерения действующих значений индукции магнитного поля производились по длине индуктора с шагом 10 мм в воздушном зазоре при различном расстоянии от рабочей поверхности магнитопровода

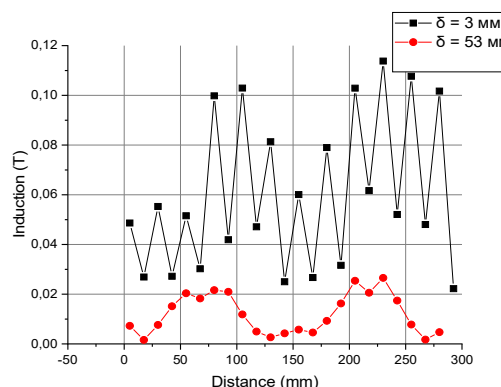


Рис. 3. Распределение нормальной составляющей индукции магнитного поля на различном расстоянии от рабочей поверхности магнитопровода индуктора №1 при токе 2 А

На рис. 3, 4, 5 приведены экспериментальные результаты измерения при различных условиях, описание условий приводится в подписях к графикам.

Как видно на рис. 3 и 4, в установке наблюдается первичный краевой эффект, выражающийся в двух резко выраженных максимумах индукции и минимумом в середине между ними, что соответствует теоретическим выкладкам, описанным в [4,5]. Также видна несимметрия по высоте, которая может быть объяснена наличием магнитопроводящего дна у тигля.

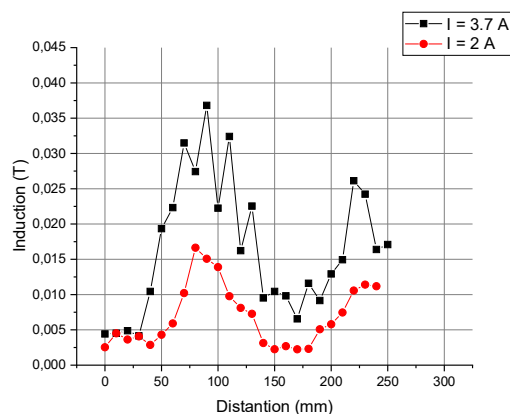


Рис. 4. Распределение нормальной составляющей индукции магнитного поля с тиглем при различных токах

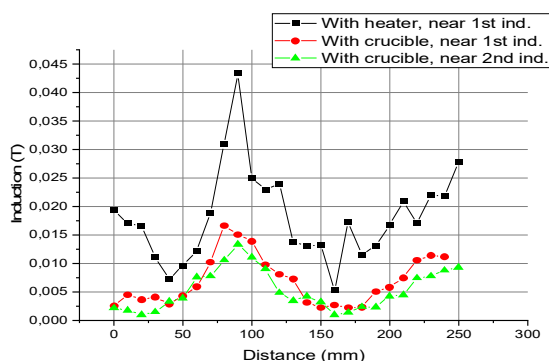


Рис. 5. Распределение нормальной составляющей индукции магнитного поля с тиглем и без при токе 2 А

Также производилось сравнение экспериментальных и расчетных кривых (рис. 6). Данные в целом совпадают, однако имеется ряд несоответствий, которые можно объяснить, в первом приближении, паразитными потоками, замыкающимися через конструкционные элементы установки и несовершенством методики измерений.

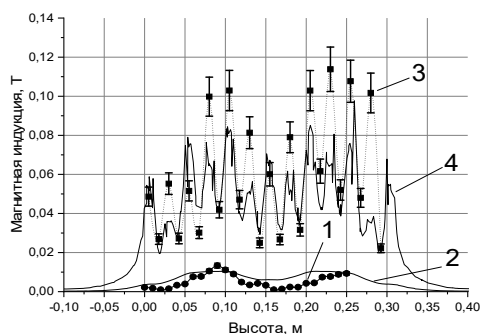


Рис. 6. Сравнение расчетной и измеренной нормальной составляющей индукции в перемешивателе, 1,2 – экспериментальная и расчетная кривая в 50 мм от магнитопровода соответственно, 3 и 4 – в 3 мм от магнитопровода соответственно

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная установка позволяет производить измерения индукции экспериментальных электротехнологических устройств, имеет потенциал для дальнейшего совершенствования.

В дальнейшем планируется развивать алгоритмы обработки данных для повышения точности и производить измерения различных установок для получения исчерпывающей статистики.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлинов А.М. Экспериментальное исследование турбулентных потоков жидких металлов // дисс. к. ф.-м. н. / ИМСС УрО РАН. Пермь, 2016
2. Бычков, С.А. Исследование электромагнитного перемешивателя цветных металлов и сплавов в процессе кристаллизации // дисс. к. т. н. / УГТУ. Екатеринбург, 2011
3. Shvydkiy, E., Zaharov, V., Bolotin, K., Smolyanov, I., Sarapulov, S. Numerical modeling of the travelling magnetic field stirrer for liquid lithium // *Magnetohydrodynamics*. vol. 53 (4), 2017, pp. 707-713
4. Сарапулов С.Ф. Индукционные магнитогидродинамические машины технологического назначения для электромеханического воздействия на металлические расплавы // дисс. д. т. н. / УГТУ. Екатеринбург, 2011
5. Бычков С. А., Назаров С. Л., Тарасов Ф. Е., Фризен В. Э. Обмотки индукционных машин вращательного и поступательного движения / Екатеринбург: УрФУ, 2017